

薄肉低炭素ステンレス鋼鋼管の冷間曲げ加工後の機械的特性

Mechanical Properties of Cold Bent Thin Wall Tubular of Low Carbon Stainless Steel

住友金属工業(株)鋼管製造所
鋼管技術部
日揮(株)

岡本 弘*・古堅宗勝
池永慶章
佐藤健二・五十嵐幹夫
山本勝美・井上和誠

1. 緒言

小口径から中大径管までの配管工事を必要とするプラントの建設において、従来の溶接施工を必要とするエルボ継手に比較して、直接曲げ加工した管を使用することは施工費の低減、工期の短縮に有効である。しかし薄肉鋼管を小さい曲げ半径で加工する場合には曲げ部の形状変化を極小化する技術、及び曲げ加工部の特性については不明確な点が残されていた。今回これらの課題について薄肉低炭素オーステナイト系ステンレス鋼管を対象として系統的に研究調査した。最適冷間曲げ加工技術と曲げ加工部の機械的特性について報告する。

2. 実験方法

(1) 曲げ加工装置

冷間曲げ加工法として、鋼管を連続して3次元に複数箇所曲げるための加工能力、自動化技術等を考慮し、管の曲げに多用されている再現性のあるロータリードローベンディング法を採用した。クランプ型（締付け型）で管を固定し、曲げ型を回転して管に引張りの力を加え巻き付けながら曲げ加工するため、曲げ内周側でもしわ、蛇腹が生じにくい。が、薄肉管の曲げ半径が小さい場合には楕円（偏平化）やしわ発生を防止するために心金を使用する。試験装置（太陽鉄製）は CNC制御によって10kWのモーター駆動で曲げ加工を行うもので、最大曲げ半径300mm及び最大曲げ角度180°の能力を有している。曲げ加工部の概要を Fig.1に示す。

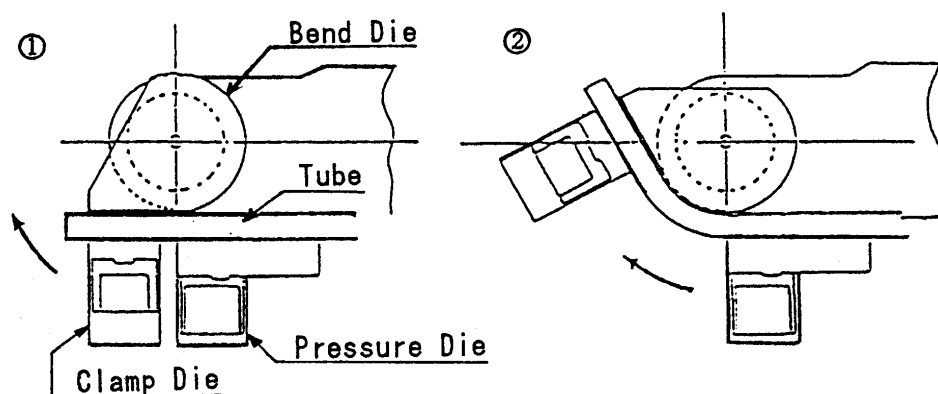


Fig.1 Outline of Rotary Draw Bending Method

平成5年1月21日受付 (Received on Jan. 21, 1993)

*Hiroshi Okamoto (Steel Tube Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1 Higashi-mukojima Nishino-cho Amagasaki 660)

(2) 供試材

Table.1に示す薄肉寸法のSUS304LTP鋼管を使用し、最適冷間曲げ加工技術を検討した。さらに曲げ加工部の特性を調査するため、SUS304LTP, SUS316LTP, R-SUS304ULC, R-SUS316ULCの4材質について、曲げ半径 3DR, 5DRにて 90° の曲げ加工を各寸法について実施した。

(3) 評価方法

曲げ加工部の評価項目として外観観察、寸法測定（偏平率，減肉率等）、引張試験、扁平試験、硬さ、およびバースト試験を実施した。曲げ加工部の形状評価基準としてANSI B31.3に示されている偏平率 8%以下を採用し、機械的特性については母管の規格であるJIS G3459 を適用した。

Table 1 Tested Tubulars

SIZE	t / D (%)
8A x Sch20S	14.5
25A x Sch20S	8.9
40A x Sch10S	5.8
40A x Sch20S	6.2
50A x Sch20S	5.8

t : wall thickness, D : Outer Diameter

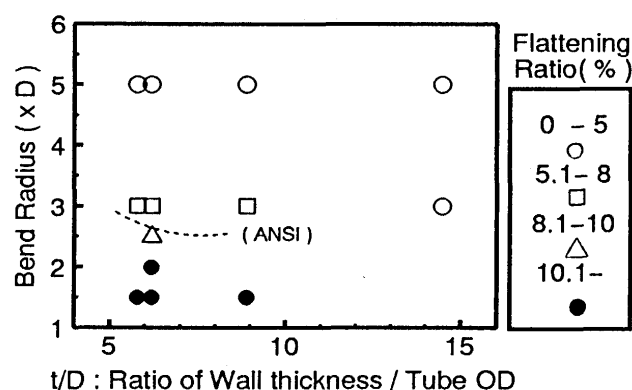


Fig.2 Flattening Ratio (0v) of cold bent tubular $0v = (D_{\max} - D_{\min}) / D$

3. 実験結果

(1) 空曲げ法による曲げ加工限界の調査

管の曲げ加工は板の場合に比較してかなり複雑であり、曲げ加工により横断面形状（偏平率で評価）の変化と肉厚変化が生じる。その形状変化は管の肉厚／外径比率（t/D）等の因子に依存する。¹⁾ Fig.2に偏平率(0v)と曲げ半径の関係を薄肉管の指標である t/Dで整理して示す。

曲げ半径が 3DR以上では全ての管でツブレや蛇腹等の局所的な変形がなく、良好な曲げ管が得られた。しかし 2.5DR以下の苛酷な曲げ条件では、局所変形が発生した。特に、t/Dが小さい40A, 50Aの管については、その傾向が著しい。不安定な局所変形を生じない場合も、曲げ半径が小さいほうが、またt/Dが小さいほうが偏平率が大きくなる傾向を示す。今回対象とした管寸法の中で、40A x Sch20Sと50A x Sch20S (t/Dは 6%程度)を曲げ半径 3DRで加工する場合には、偏平率が 7%前後となる。

(2)心金曲げの適用

代表的な薄肉配管寸法である40A x Sch20S($t/D=6.2\%$)の曲げ部の偏平率を改善するため心金曲げを適用した結果をFig.3に示す。空曲げ法では偏平率が7%前後になる3DR曲げ加工に心金曲げ法を適用すると、偏平率が3~4%に改善された良好な曲げ管が得られた。しかしながら、心金曲げを適用しても苛酷な曲げ条件である1.5DRの場合には、偏平率が10%程度であるため、曲げ加工限界の拡大は不可能である。

今回検討した結果から小口径薄肉ステンレス鋼管の冷間曲げ加工において、モノマーキャストニングナイロン製プラグマンドレルを用いた心金曲げの適用は、偏平率の改善効果が顕著であり、また内面疵の発生も認められず、極端な作業能率の低下もないため簡便な改善技術である。

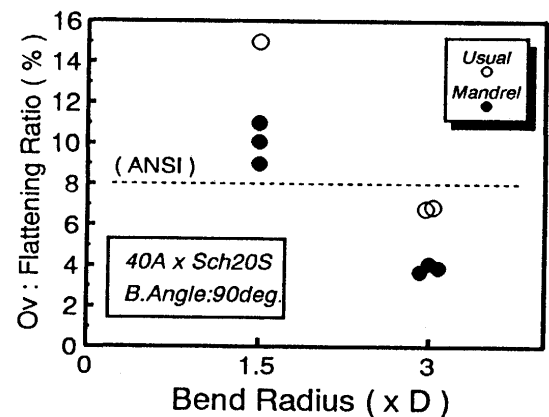


Fig.3 Effect of Mandrel Bending on the Flattening Factor

(3)最適曲げ加工技術のまとめ

①曲げ半径が5DRの場合には、今回検討した薄肉管の呼び径に関係なく、空曲げ法により偏平率8%以下を十分満足するため、改善技術の適用は必要なく、空曲げ法が可能である。

②曲げ半径が3DRの場合には、管の t/D が大きい寸法（本研究の25A x Sch20S, 8A x Sch20S）は5DR曲げと同様に空曲げ法が可能である。

③肉厚/外径比率が約6%の管寸法（本研究の40A x Sch10,20S, 50A x Sch20S）には偏平率8%以下を安定して得るため心金曲げ法の適用が有効である。

Table 2 Selection of the Best Bending Method for Thin-Wall Tubular

SIZE	Bend Radius	5 D R	3 D R
8A x Sch20S		A	A
25A x Sch20S		A	A
40A x Sch10S,20S		A	B
50A x Sch20S		A	B

A : Rotary Draw Bending

B : Rotary Draw Bending with Mandrel

(4)寸法特性（偏平率）

代表的な曲げ条件であるSUS304LTPの40A x Sch20Sについて曲げ部の長手方向の偏平率変化をFig.4に示す。さらに管寸法および材質の影響について、各条件の3本の最大値を t/D にて整理しFig.5に示した。3DR曲げについて心金曲げを適用した効果により偏平率は5DR曲げに比較して約1%の増加に抑えられた。曲げ定常部では約5%程度の値を示し、偏平率8%以下の基準を満足する。また曲げ開始部及び曲げ終了部近傍の境界部では局所的な変化は認められず、直管部から曲げ加工部にかけて連続的に変化し良好である。いずれの管寸法および材質についても最大偏平率は8%以下の基準を満足した。曲げ外周（T）側減肉率、曲げ内周（C）側増肉率については各寸法いずれの場合も5DR曲げに比較して3DR曲げの方が大きくなる傾向が認められた。5DR曲げのT側減肉率及びC側増肉率は約4~6%であるが、3DR曲げの場合には、T側減肉率が約6~8%またC側増肉率は約8~12%の値を示した。しかし、その傾向はいずれの材質についても同様であった。

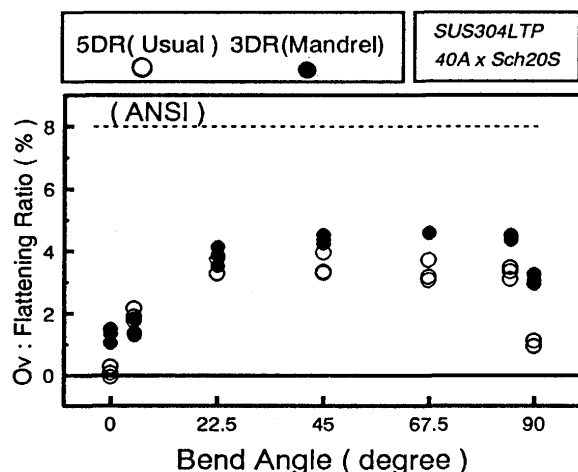


Fig.4 Flattening Ratio(Ov) of Cold Bent Portion at 3D and 5D Bend Radius

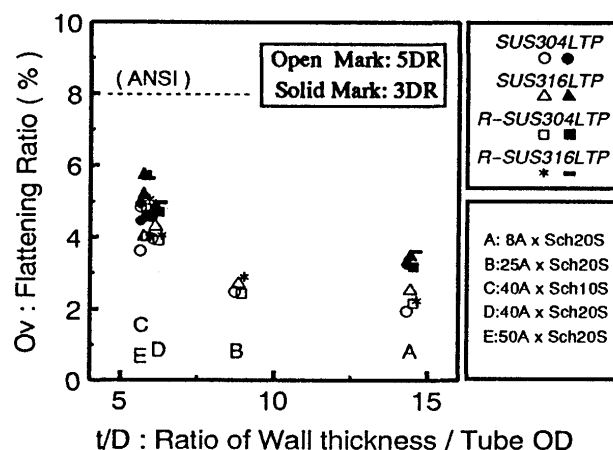


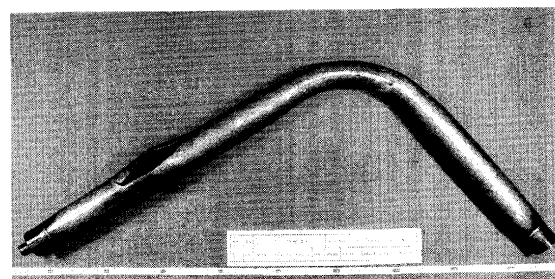
Fig.5 Effect of Tube size and Materials on the Flattening Ratio

⑤機械的特性

代表的な曲げ条件である SUS304LTPの40A x Sch20Sについて曲げ部の引張性質を直管部と比較してTable 3 に示す。曲げ部のC側、T側において耐力及び引張強度の上昇と伸びの低下が認められる。伸びの低下については曲げ加工による強度上昇と肉厚減少の影響が生じると考えられるが、いずれの管寸法・材質についても曲げ加工部の耐力は 390~490N/mm²引張強度は 690N/mm²前後でありT側の伸びもJIS G3459 の規定を満足した。バースト試験結果は Photo.1 に示すように直管部で破壊が発生し、曲げ加工部の減肉、増肉断面の偏平化の寸法変動および加工硬化による強度上昇の影響を含めて曲げ部の機械的特性は問題ないと判断された。

Table 3 Tensile properties of Cold bent Tubular

Bend Radius	Sampling Location	U.T.S. (N/mm ²)	0.2% Off set P.S. (N/mm ²)	Elongation (%)
5 D R	Mother tube	609	305	57
	Bent(T)	681	438	41
	Bent(C)	635	388	51
3 D R	Mother tube	614	294	54
	Bent(T)	730	492	37
	Bent(C)	655	484	41
JIS G3459	SUS304LTP	≥ 480	≥ 175	≥ 35



40A x Sch20S, 3DR, 90° Bending

Photo.1 Appearance of Cold bent tubular after Burst testing (SUS304LTP)

4. 結言

低炭素オーステナイト系ステンレス鋼の薄肉配管において、今回確立した冷間曲げ加工技術を適用した曲げ管は直管部と同等以上の性能を示すことが確認された。

本研究は、東北電力㈱、北海道電力㈱、東京電力㈱、中部電力㈱、北陸電力㈱、関西電力㈱、四国電力㈱、中国電力㈱、九州電力㈱、日本原子力発電㈱の10電力会社および、日本原燃サービス㈱により電力共通研究として行なわれた委託研究の成果の一部である。